

HAVACILIK VE UZAY UYGULAMALARINDA ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

Emre ACAR (ORCID: 0000-0003-1114-6251)*
Tuğrul OKTAY (ORCID: 0000-0003-4860-2230)

Uçak Mühendisliği Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

Geliş / Received: 01.02.2017
Kabul / Accepted: 11.09.2017

ÖZ

Şekil hafızalı alaşımlar metalik akıllı malzeme grubu olup fonksiyonel özellik ile birlikte mekanik dayanım da gerektiren uygulamalar için günümüzde kullanılan ve kullanım alanları hızla genişleyen malzemelerdir. Bu makalede şekil hafızalı alaşımların temel fonksiyonel özelliklerinden ve bu özellikleri meydana getiren mekanizmalardan bahsedilmiştir. Daha sonra, şekil hafızalı alaşımların havacılık ve uzay alanındaki mevcut ve potansiyel uygulamaları derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şekil hafızalı alaşımlar, havacılık ve uzay uygulamaları, faz dönüşümleri

SHAPE MEMORY ALLOYS IN AEROSPACE APPLICATIONS

ABSTRACT

As a metallic class of smart materials, shape memory alloys are commonly used and have promising potentials in applications that require a good strength beside functional properties. In this study, fundamental properties and their mechanisms are discussed. Afterwards, aerospace applications of shape memory alloys are reviewed.

Keywords: Shape memory alloys, aerospace applications, phase transformations

1. GİRİŞ

Şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), tersinir katı faz dönüşümü kabiliyetleri sayesinde günümüzde ve gelecekte mühendislik uygulamaları için önemli bir yere sahiptir. Bu alaşımların başlıca kullanım alanları biyomedikal, havacılık ve uzay, otomobil, enerji, elektronik, inşaat ve sismik olarak sayılabilir [1-2]. Şekil hafızalı alaşımların temel özgün özellikleri, yüksek deformasyondan sonra bile dışarıdan herhangi bir müdahale olmaksızın, oluşan deformasyonu geri kazanabilmesi (süperelastisite) ve yine yüksek deformasyon oranlarından sonra malzemenin ısıtılarak eski halini alabilmesi (şekil hafıza etkisi) olarak sayılabilir [2]. Yukarıdaki iki özellikte de geri şekil kazanımının ana nedeni, malzeme içinde gerçekleşen katı faz dönüşümleridir. Süperelastik davranışta faz dönüşümünü sağlayan itici güç kuvvet, şekil hafıza etkisinde ise faz dönüşümünün itici gücü sıcaklıktır.

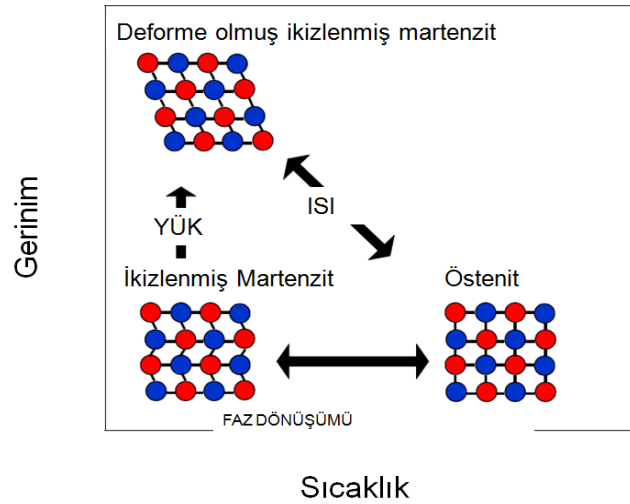
Şekil hafızalı alaşımlarda görülen katı faz dönüşümlerini, kristalografi ve termodinamik prensipleri ile açıklamak mümkündür [2-5]. Şekil hafızalı alaşımlar iki temel katı faz içermektedirler. Bunlardan ana faz östenit yüksek sıcaklık fazıdır ve sıcaklığın -alaşım sistemine göre değişen- belli bir değerin üzerinde olması halinde kararlı olur ($T > A_f$, östenit bitiş sıcaklığı). Diğer faz ise düşük sıcaklık fazı olan martenzit fazıdır ve $T < M_f$ (martenzit bitiş sıcaklığı) olması halinde kararlı olur. Bu iki ana fazdan başka, bazı alaşım sistemlerinin çeşitli kimyasal kompozisyonlara sahip olması durumunda, ara fazlarda (R-phase) görülebilmektedir [6]. Düşük sıcaklık fazı olan martenzit iki şekilde oluşabilir. Birincisi, dışarıdan herhangi bir kuvvet uygulanmadan, sadece

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 352 207 66 66 / 41177; e-mail / e-posta: emreacar@erciyes.edu.tr

E. ACAR, T. OKTAY

sıcaklık ile gerçekleşen faz dönüşümü sonucu oluşan martenzit fazıdır. Bu tür faz dönüşümleri sonucunda, malzeme içerisinde kafes yapıları östenit diziliminden martenzit dizilimine dönüşür. Malzeme içerisinde oluşan ikizlenmiş martenzitler farklı yönelimlerde olabilir ve bundan dolayı malzemede makro boyutta bir şekil değişimi gözlenmez. İkincisi ise faz dönüşümünde itici gücün kuvvet olduğu gerilme-kaynaklı (stress-induced) martenzit fazıdır. Bu dönüşümde gerilme, oluşan farklı yönelimlerdeki martenzit varyantlarını önüne katar ve tek varyant oluşturmaya çalışır. Buda malzemede makro ölçekte şekil değişimine neden olur. Östenit ve martenzit arasında gerçekleşen bu faz dönüşümleri hem sıcaklık hem de gerilme kaynaklı olabilir ve tersinir olduğu için literatürde termo-elastik martenzitik faz dönüşümleri olarak bilinmektedir [7].

Şekil 1'de şekil hafızalı alaşımların sıcaklık kaynaklı ve gerilme kaynaklı faz dönüşümleri şematik olarak gösterilmektedir. Düşük sıcaklıktaki ikizlenmiş martenzit (twinned martensite) fazının sıcaklığı artırılırsa, malzeme şekil değişimi geçirmeksizin yüksek sıcaklık fazı östenite dönüşür. Malzemenin sıcaklığı tekrar düşürülür ise martenzit fazına geri dönüşüm görülür.



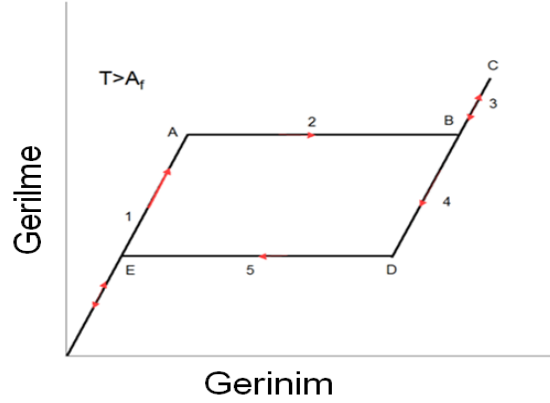
Şekil 1. Şekil hafızalı alaşımlarda sıcaklık ve yük kaynaklı faz dönüşümleri [8]

İkizlenmiş martenzit düşük sıcaklıkta kuvvet uygulanarak deforme edilirse, deformasyon ve ikizlenmenin beraber görüldüğü martenzit (de-twinned martensite) fazına dönüşür. Bu dönüşüm sırasında dış kuvvet uygulandığı için malzemede şekil değişimi gözlenir. Bu durumda malzeme üzerindeki kuvvet kaldırılrsa dahi sıcaklık düşük ($T < A_f$) olduğu için tekrar orijinal haline geri dönemez. Bu dönüşüm için ekstra enerji gerekir ve bu ekstra enerji sisteme ısı olarak verilir. Isıtılan malzemenin sıcaklığı A_f dönüşüm sıcaklığı üzerine çıktığı zaman, deforme olmuş martenzit, östenit fazına dönüşür ve sıcaklık deformasyondan önceki başlangıç sıcaklığına getirilirse (malzeme soğutulursa), orijinal fazı olan ikizlenmiş martenzit fazına geri döner. Bu işlem sonunda, malzeme üzerinde meydana gelen deformasyon geri kazanılmış ve malzeme orijinal boyutlarına ulaşmış olur.

Şekil 2'de ŞHA'ların tipik bir süperelastik davranış eğrisi görülmektedir. Şekil hafızalı alaşımlarda süperelastik davranışı gözlemlemek için malzeme sıcaklığının A_f sıcaklığı üzerinde yani malzemenin östenit fazında olması gerekir. Aşağıdaki şekilde eğrinin 1 numaralı bölümü, östenit fazının elastik deformasyonunu ifade etmektedir. Gerilme arttıkça elastik deformasyon devam eder ve elastik deformasyon, grafikte doğrusal olarak görülür. Doğrusal grafiğin A noktasında eğildiği görülür. Bu nokta gerilme kaynaklı martenzit (stress induced martensite) oluşumunun başlangıç noktasıdır. Bundan sonraki 2 numaralı bölgede grafik plato şeklinde devam eder ve bu bölge östenit-martenzit faz dönüşümünü gösterir.

Faz dönüşümü platosunun bittiği B noktasında, 3 numaralı bölge başlar ve teorik olarak östenit-martenzit faz dönüşümünün bittiğini ve östenitin tamamen martenzit fazına dönüştüğü anlamına gelir. 3 numaralı bölge, gerilme kaynaklı oluşan martenzit fazının elastik deformasyonunu ifade eder ve bu bölge devam ettirilirse doğrusal şekilde görülen elastik deformasyon grafiği, martenzit fazının plastik deformasyonu ile sonuçlanır. Plastik deformasyon oluşmadan önce malzeme üzerindeki yük kaldırılır ise meydana gelen şekil değişimi geri kazanılabilir ve eğri 3. bölgede kendi üzerinden geri döner.

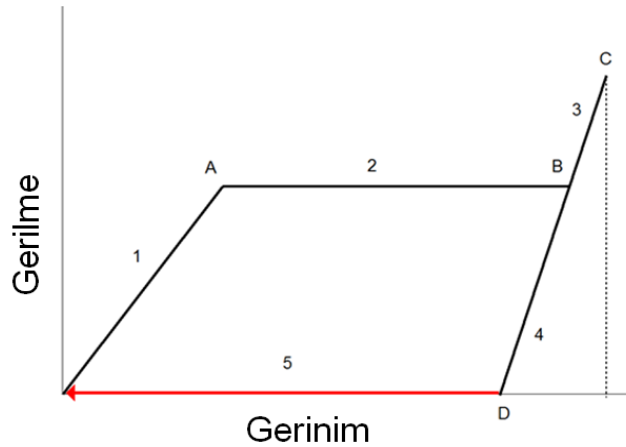
HAVACILIK VE UZAY UYGULAMALARINDA ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR



Şekil 2. Şekil hafızalı alaşımların süperelastik davranış eğrisi

Malzeme üzerindeki yükün tamamen kaldırılması durumunda 3 bölgesinde oluşan martenzit fazının elastik deformasyonu ve daha önce yapılan elastik deformasyon (4. bölge) geri kazanılır. 4 bölgesinin bitiminde bulunan D noktasında tekrar bir doğrusallıktan sapma ve yük platosu görülür ve bu kısımda (5 bölgesi) gerilme kaynaklı oluşan martenzit fazı, yükün malzeme üzerinden kaldırılması ile orijinal fazı olan östenit fazına geri dönüşür. Bu faz dönüşümü E noktasında sona erer ve malzeme tamamen östenit fazına geçmiş olur. Yükün kaldırılmasına devam edilmesi ile daha önce oluşan elastik deformasyon da geri kazanılır ve malzeme başladığı noktaya (deformasyondan önceki haline) geri dönmüş olur. Bu şekilde %10-15 civarı deformasyonları geri kazanmak mümkündür.

Şekil 3'te şekil hafızalı alaşımların tipik bir şekil hafıza etkisi eğrisi görülmektedir. Şekil hafıza etkisinin gözlemlenebilmesi için malzemenin martenzit fazında olması gerekir. Şekildeki 1 bölgesinde martenzit fazında olan malzeme elastik olarak deforme olur ve A noktasında bu elastik deformasyon biter. A noktası, ikizlenmiş martenzit fazının deformasyonunun başladığı noktadır ve bu deformasyon 2 bölgesi olarak görülen plato boyunca devam eder. Bu bölgede süperelastik etkideki gibi (Şekil 2) bir faz dönüşümü olmamakta, sadece ikizlenmiş halde bulunan atomların kuvvet etkisi ile yönelimleri değişmektedir. Bundan dolayı da malzemede makro boyutta şekil değişimi görülür.



Şekil 3. Şekil hafızalı alaşımların şekil hafıza etkisi eğrisi

2 bölgesinin bitişi ile B noktasında ikizlenmiş martenzit varyantlarının yönelimleri tamamlanmıştır. Kuvvet artırılmaya devam ederse, malzemede plastik deformasyon görülebilir. Eğer uygulanan yük kaldırılır ise grafik 4 numaralı eğriyi takip eder ve bu bölge malzeme de oluşan elastik deformasyonun geri kazanımıdır. 4 numaralı eğri D noktasında sonlanır ve görüldüğü gibi eğri başlangıç noktasına ulaşmamıştır. Buda malzemede şekil değişimi görüldüğünü ve yükün kaldırılması ile geri kazanılmadığını gösterir. Oluşan şekil değişiminin geri kazanılabilmesi için malzemeye dışarıdan enerji verilmesi gerekir ve bu enerji ısı enerjisidir. Eğer malzeme bu durumda iken ısıtılır ve sıcaklığı A_f sıcaklığı üzerine çıkarılır ise Şekil 1'de de görüldüğü gibi deforme olmuş

E. ACAR, T. OKTAY

martenzit fazı önce östenit fazına dönüşecek ve şekil değişimi geri kazanılacaktır. Bu geri kazanım grafikte 5 numaralı bölge ile gösterilmiştir. Bu bölgede eğri ısı etkisi ile tekrar başladığı noktaya geri döner ve malzeme orijinal haline dönmüş ve oluşan şekil değişimi geri kazanılmış olur.

Şekil 3'te gösterilen toparlanma sırasında malzemenin boyutlarının sınırlandırılması yani boyut değişimine izin verilmemesi halinde ise malzeme içyapısında gerilme oluşur. Bu gerilmenin nedeni, şekil değiştirmeye çalışan atom grubuna, kısıtlayıcılar tarafından izin verilmemesidir. Bu özelliğe şekil hafızalı alaşımların pratik uygulamalarda kullanılabilecek yararlı bir özelliğidir [1].

Şekil hafızalı alaşım sistemlerinin kimyasal kompozisyonu ya da farklı ısı işlemlerin uygulanması [2, 9-10], yukarıda verilen özellikleri ve dönüşüm sıcaklıklarını değiştirebilir ve bu değişimlerin farklı nedenleri vardır. Çökelti oluşması, tane büyüklüğü değişimi, matrisin kimyasal kompozisyonun değişmesi vb. bu nedenlerden sadece birkaçıdır [2].

Şekil hafızalı alaşım sistemleri (AuCd, MnCu, MnPt, CuSn, NiAl, AgCd, CuZn, FePd, FeMnSi vb.), NiTi ve NiTi-bazlı alaşımlar, dayanım, birim şekil değişim miktarı, korozyon dayanımı, tribolojik özellikleri, biyouyumluluk gibi etkileyici özelliklerinden dolayı üzerinde oldukça fazla çalışılan ve diğer alaşım sistemlerinin (NiTiHf, NiTiPd, NiTiCu, NiTiHfPd, NiTiHfCu vb.) üretiminde temel olarak kullanılan alaşımlardır [10-14]. Bundan dolayı, pratik uygulamalarda en çok kullanılan ve kullanılma potansiyeli olan alaşım sistemleri de NiTi ve NiTi-bazlı alaşım sistemleridir. Aşağıdaki tabloda (Tablo 1) ticari olarak kullanılan NiTi alaşımlarının bazı özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Ticari NiTi alaşımlarının bazı özellikleri [15]

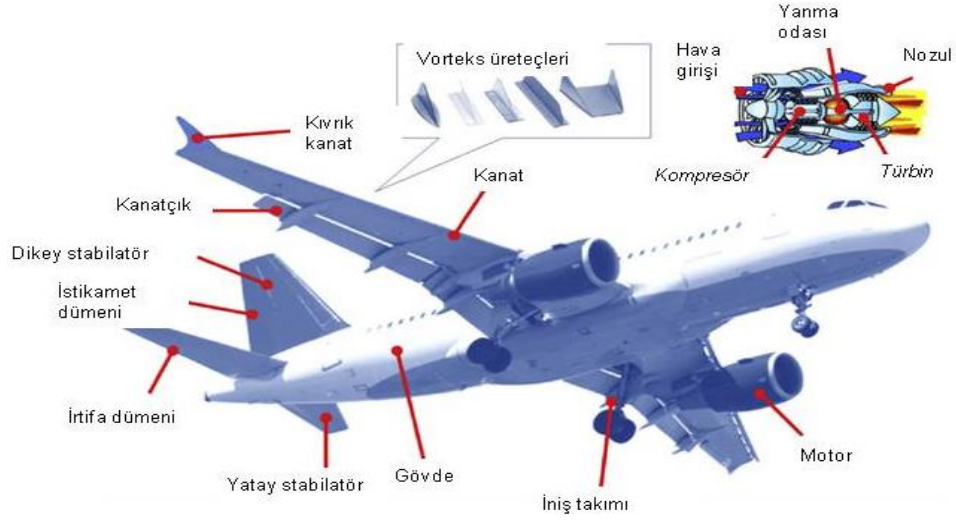
Özellik	Sembol	Birim	Martenzit	Östenit
Korozyon Dayanımı	-	-	300 serisi paslanmaz çelik ya da Ti alaşımlarına benzer	-
Yoğunluk	ρ_D	kg/m^3	6450-6500	
Elektrik direnci	ρ_R	$\mu\Omega cm$	76-80	82-100
Özgül Isı	c	J/kgK	836,8	836,8
Isıl İletkenlik	k	W/mK	8,6-10	18
Isıl Genleşme Katsayısı	α	m/mK^{-1}	$6,6 \times 10^{-6}$	$11,0 \times 10^{-6}$
Çekme Dayanımı	σ_{UTS}	MPa	895 (tavlanmış) 1900 (ısı işlem ile sertleştirilmiş)	-
Elastiklik Modülü	E	GPa	28-41	75-83
Akma Dayanımı	σ_Y	MPa	70-140	195-690
Poisson Oranı	ν	-	0,33	-
Manyetik Hassasiyet	χ	$\mu emug^{-1}$	2,5	3,8

2. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN HAVACILIK VE UZAY UYGULAMALARI

Şekil hafızalı alaşımların havacılık uygulamaları, 1970'li yılların başlarında F-14 savaş uçaklarının hidrolik borularında kaplin olarak kullanılması ile başladığı söylenebilir [2]. Bu uygulamanın başarılı olmasından sonra, şekil hafızalı alaşımların havacılık alanında kullanımının önü açılmıştır. Diğer taraftan şekil hafızalı alaşımlar ve akıllı malzemeler, 2009 yılında Amerika Havacılık ve Uzay Bilimleri Enstitüsü (AIAA) tarafından havacılık ve uzay alanında gelişmekte olan 10 teknoloji arasında sayılmıştır [16]. Şekil 4'te şekil hafızalı alaşımların ticari bir uçakta mevcut ve potansiyel kullanım yerleri verilmiştir.

Aktüatörler başta olmak üzere yapısal bağlantı elemanları, titreşim sönümleyiciler, değişken nozul ve kanat, motor valfleri vb. mekanizmalar, şekil hafızalı alaşımların havacılık uygulamalarına örnek olarak gösterilebilir [15, 17-18]. Tablo 2'de ŞHA'ların uçakların gövde ve motorlarındaki kullanım yerleri ve ilgili referanslar gösterilmektedir.

HAVACILIK VE UZAY UYGULAMALARINDA ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR



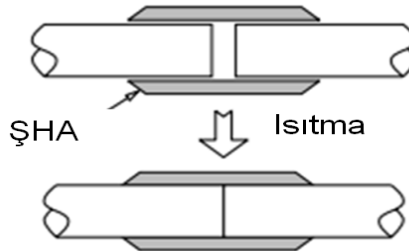
Şekil 4. Şekil hafızalı alaşımların bir yolcu uçağında mevcut ve potansiyel uygulamaları [17-18]

Tablo 2. Şekil hafızalı alaşımların hava araçlarının gövde ve motor kısımlarında kullanım yerleri

Gövde		Motor	
Parça	Referans	Parça	Referans
Gövde	[19]	Hava inlet	[20]
Panel	[21]	Nozul	[22]
Kanat/Stabilatör	[23]	Rotor	[24]
Kıvrık kanat	[25]	İniş takımları	[26]
Vorteks üreticisi	[27]	Hidrolik borular	[2]
Flap kenarı	[28]		
Gövde sparları	[15]		

Şekil 5'te ŞHA dan üretilmiş bir kaplin mekanizmasının kesit görünüşü görülmektedir. Burada kaplinin yaptığı iş, boruları birbirine bağlamak ve ayrılmasını engellemektir.

ŞHA parçası genişletildikten sonra borular yerleştirilir

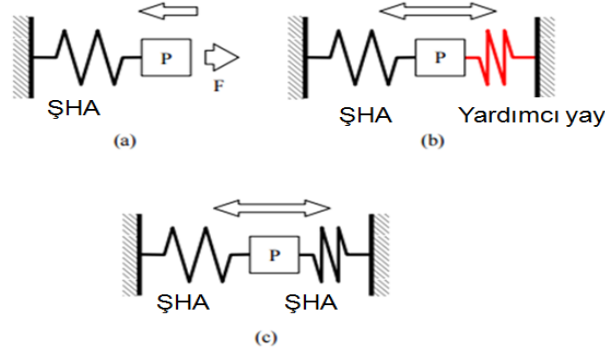


Şekil 5. Şekil hafızalı alaşımdan üretilmiş bir kaplinin şematik gösterimi [1]

Şekil hafızalı alaşımdan imal edilmiş kaplin, martenzit fazında genişletilir ve birleştirilmek istenen borular kaplin içerisine yerleştirilir. Daha sonra kaplinin sıcaklığı artırılır ve kaplin martenzit fazından östenit fazına dönüşmeye başlar. Sıcaklık A_1 'i geçtiğinde, kaplin tamamen östenit fazına geçmiş olur. Isı enerjisi ile kaplin orijinal şekli olan genişletilmeden önceki şeklini hatırlar ve büzülür. Böylece borular sıkıştırılmış ve bağlantı sağlanmış olur. Sıcaklık belli bir değerin (M_s gibi) altına düşmedikçe, ŞHA kaplin östenit fazında kalır ve

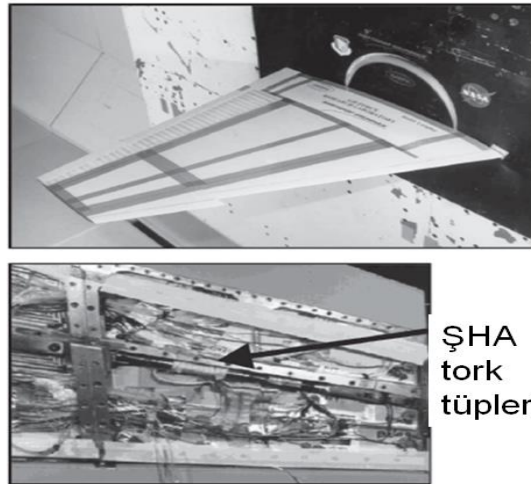
E. ACAR, T. OKTAY

şeklinde (dolayısı ile borular üzerine uyguladığı sıkıştırma kuvvetinde) herhangi bir değişiklik olmaz. Bu uygulamada, bağlantı elemanlarında sıkça görülebilen sıkıştırma kuvvetinin azalması vb. gibi olumsuzlukların görülmesini de ortadan kalkmış olur. Burada dikkat edilmesi gereken, kaplinin çalışacağı ortamın sıcaklığı ya da bu sıcaklığa göre kaplin malzemesinin kritik dönüşüm sıcaklıklarının ayarlanmasıdır. Şekil hafızalı alaşımlarda kritik dönüşüm sıcaklıklarının kimyasal kompozisyon değişimi ve termo-mekanik işlemler ile ayarlanabildiği bilinmektedir [1]. Şekil 6'da şekil hafızalı alaşım kullanarak tasarlanmış basit bir aktüatör mekanizması görülmektedir.



Şekil 6. ŞHA kullanılarak tasarlanan basit bir aktüatör mekanizması a) Tek yönlü aktüatör, b) Yay yardımcı aktüatör ve c) Çift yönlü aktüatör [29]

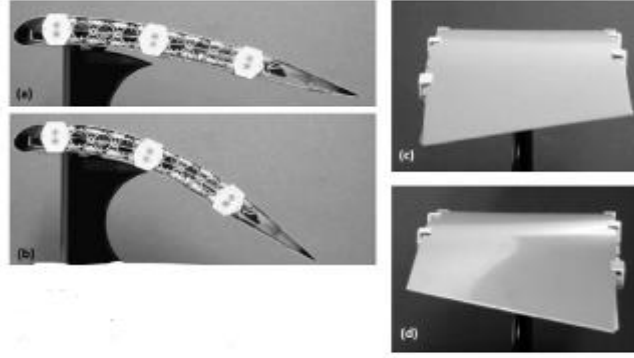
Araştırmacıların üzerinde çalıştığı uygulama alanlarından bir tanesi de akıllı kanat projeleri altında, değişken hava şartları ve durumlara göre şekil değiştirebilen ve optimize olabilen akıllı kanat yapılarıdır. Bu projelerden bazılarında [15, 18, 30] nolu referanslardan ulaşılabilir. Akıllı kanat projesinde amaç, kanat yapısının farklı ortamlar için akıllı malzemeler kullanılarak optimize edilmesidir. Bu projelerin ŞHA ile ilgili bölümlerinde, ŞHA tel ve ŞHA tork tüpünün (Şekil 7) kullanılması planlanmıştır. ŞHA tel ile menteşesiz kanatçık tasarımı ve ŞHA tork tüpü ile ise F-18 kanat yapısına şekil verilmesi hedeflenmiştir. İki uygulamada da şekil hafıza alaşımlardan üretilmiş aktüatörler kullanılmaktadır.



Şekil 7. Smart Wing projesi ile geliştirilen ŞHA tork tüpünün model kanata uygulanmış hali ile bütün ve kesit görüntüsü [18]

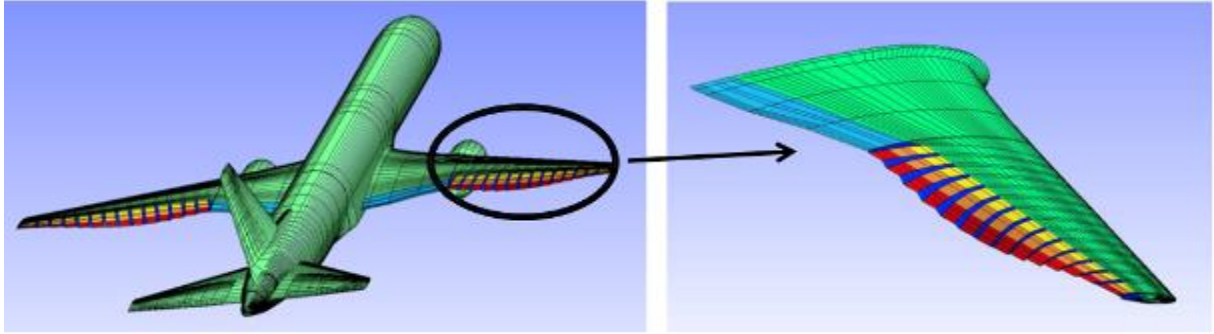
Şekil hafızalı alaşımların hava araçlarının kanatlarında diğer bir uygulaması ise tamamen ya da kısmi olarak şekil değiştirebilen kanat tasarımlarıdır. Aşağıdaki şekillerde farklı araştırmacılar tarafından ŞHA'lar kullanılarak tasarlanan esnek kanat modelleri gösterilmektedir. Bu uygulamalardaki amaç farklı ortam şartlarına uyum sağlayabilen kanat üretimidir.

HAVACILIK VE UZAY UYGULAMALARINDA ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR



Şekil 8. Şekil hafızalı alaşım ile tasarlanmış aktüatörün şekil değiştirebilen kanatlarda kullanılması [31]

Bu çalışmalarda kanat profilinin farklı uçuş ortamlarına göre değiştirilebildiği ve böylece uçuş performansının aerodinamik olarak optimize edilebildiği saptanmıştır. Kanat profilinin şekil değişiminde şekil hafızalı teller kullanılmakta ve uygun kanat şeklini elde edebilmek için, bu malzemelerin yüksek oranda geri kazanılabilir şekil değiştirebilmesi gerekmektedir. Şekil 9’da NASA ve Boeing tarafından üzerinde çalışılan esnek kanat kenar tasarımları gösterilmektedir.



Şekil 9. NASA ve Boeing işbirliği ile yapılan esnek kanat kenar tasarımları [32]

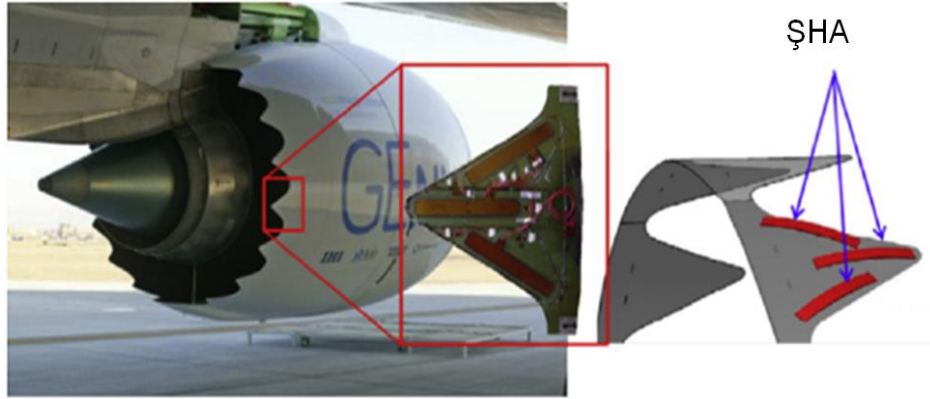
Bu yöndeki çalışmalar, NASA Armstrong Uçuş Araştırma Merkezi tarafından FlexFoil adıyla 2014 yılında gerçek uçuşlarda test edilmeye başlanmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır (Şekil 10). Testler sırasında esnek kanat teknolojisi, Gulfstream III jeti üzerinde denenmiştir. Geliştirilen akıllı kanat flapı, -9°C ile +40°C sıcaklıkları arasında 30°'ye kadar şekil değişimi sağlayabilmektedir. Buda günümüzde motor yardımı ile kontrol edilen kanat flaplarına ihtiyaç bırakmamaktadır. Esnek kanat flapı kullanımı ile hafiflik, bakım masraf ve işçiliğin azalması (motor yerine sadece ŞHA kullanılır), %3-12 arası yakıt tasarrufu ve iniş-kalkış sırasında %40'a kadar ses azaltılabileceği belirtilmektedir [33].



Şekil 10. Flexsys şirketi tarafından geliştirilen esnek kanat flapı [33]

E. ACAR, T. OKTAY

Şekil hafızalı alaşımların kullanıldığı diğer bir havacılık uygulaması Boeing firması tarafından denenmektedir. Boeing firması şekil hafızalı alaşımlardan yapılmış aktüatörler kullanarak hareketli şerit (chevron) tasarlamış ve bu tasarımı Boeing 777-300 ER ticari uçağı üzerine takılı GE90-115B jet motoru üzerinde test etmiştir [18, 22]. Egzoz nozullarında kullanılan bu şeritlerin görevi hava ve sıcak gazı karıştırmak ve böylece ses oluşumunu azaltmaktır. Düşük hız ve irtifalarda, şeritler içe doğru kıvrılır ve hava-gaz karışımını sağlayarak motor sesini azaltır. Yüksek hız ve yüksek irtifalarda ise ŞHA şeritler düzleşir ve motor performansını artırır. Bu mekanizma Şekil 11’de gösterilmektedir. Bu testler sonucunda, hareketli şeritlerin kalkış sırasında defleksiyonunu artırarak sesi azaltmada ve uçağın seyri sırasında ise defleksiyonu azaltarak verimi artırmada oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 11. Boeing tarafından geliştirilen değişken geometrili şerit uygulaması [15, 18]

Bu uygulamada kullanılan şekil hafızalı alaşımların, jet motorlarının sıcak olan egzoz kısımlarında kullanılacak olmasından dolayı, dönüşüm sıcaklıkları yüksek olan ($>100^{\circ}\text{C}$) şekil hafızalı alaşımların geliştirilmesine ihtiyaç vardır ve bu çalışmalar birçok araştırma merkezi ile birlikte NASA Glenn Araştırma Merkezlerinde yürütülmektedir. Buna benzer projeler NASA Fundamental Aeronautics Program ve Aeronautical Sciences vb. projelerle desteklenmiştir. Geliştirilen bu yüksek sıcaklık alaşım sistemlerine NiTiHf, NiTiPt, NiTiPd ve NiTiHfPd gibi alaşımlar örnek olarak verilebilir. Özellikle yüksek sıcaklık ve yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için NiTiHf ve NiTiHfPd alaşım sistemleri ümit vericidir [10, 30, 34-38].

Şekil hafızalı alaşımların havacılıktaki kullanım alanlarına insansız hava araçları da dahildir [39]. Şekil hafızalı alaşımlar kullanılarak insansız hava araçları için uyumlu kanatlar tasarlanabilir ve bu kanatlar değişebilen hava şartlarına göre şekil değiştirmekte ve aerodinamik optimizasyonu sağlayabilmektedirler. Ayrıca, ŞHA ile tasarlanan kanatların farklı aerodinamik basınçlara dayanabildiği ve değişen hava koşulları ile geleneksel aktüatörlerin aksine, direngenlik özelliklerinde herhangi bir kayıp olmadığı gözlenmiştir [39].

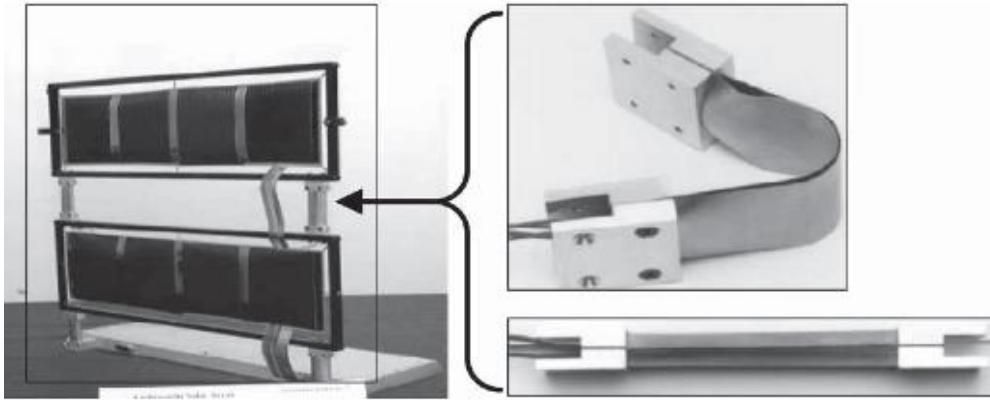
Şekil hafızalı alaşımların diğer bir uygulama alanı ise uzay araç teknolojileridir [18, 40]. Uzay araçlarında ŞHA’ların en çok enerji sönmüleyebilme ve aktüatör olarak kullanılabilme özelliklerinden yararlanılır. Atmosferin olmadığı ortamlarda, uzay aracının inişi ya da hareketi sırasında aktüatör mekanizmalarına ve titreşim sönmüleme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca bu sistemlerin hafifliğini sağlamak için küçük olmaları gerekmektedir. Bu noktada, yüksek dayanım özelliği ile şekil hafızalı alaşımlar ön plana çıkmaktadır.

Uydu gibi konuşlandırılabilir uzay yapıları için önemli konulardan biride şok tahliyesidir [18]. Uzay araçlarında şok tahliyesi için kullanılan en yaygın mekanizmalardan biri Pyrotechnic şok-tahliye mekanizmasıdır [41]. Buna rağmen birçok konuşlandırılabilir uzay yapılarında şok etkisinden dolayı hasar görülebilmektedir. Bunu ortadan kaldırmak için, ŞHA ile tasarlanan mekanizmalar yardımıyla, şok etkisinin kademeli olarak tahliye edilmesi ve buna bağlı olarak ta uzay araçlarında hasarın önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Micro Sep-Nut ve QWKNUT bu amaçla tasarlanan iki mekanizmadır [15, 18]. Bu mekanizmalar, uzay aracına montaj sırasında deforme edilir (de-twinned martensite) ve yörüngede sıcaklığın kademeli artması ile tekrar orijinal şeklini geri kazanır. Böylece şok hasarı önlenmiş olur. Diğer taraftan ŞHA’lar ile tasarlanan şok-tahliye mekanizmaları hafif ve küçük olabildiklerinden, küçük uydu boyutları için de elverişlidir.

Şekil hafızalı alaşımların uzay araçlarında diğer bir uygulaması da hafif esnek solar panel (Lightweight Flexible Solar Array, LFSA) mekanizmasıdır [42]. Bu mekanizmanın detayları Şekil 12’de gösterilmiştir.

Bu mekanizmada güneş panelleri birbirine şekil hafızalı tel ile bağlanmıştır. Daha önceki bölümlerde bahsedilen şekil hafıza etkisi kullanılarak, panel pozisyonları kolayca ayarlanabilmektedir. Bu projenin tasarımı NASA ve Lockheed Martin tarafından yapılmıştır [42].

HAVACILIK VE UZAY UYGULAMALARINDA ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR



Şekil 12. Lightweight Flexible Solar Array mekanizması [42]

3. ŞEKİL HAFIZALI TASARIMLARIN AVANTAJ-DEZAVANTAJLARI VE GELECEĞİ

Birçok malzeme ve sistem gibi, şekil hafızalı alaşımlarda avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, şekil hafızalı alaşımların aktüatör tasarımları için oldukça avantajlı olduğunu göstermiştir. Tablo 3, şekil hafızalı aktüatör sistemlerinin özelliklerini farklı aktüatörler ile karşılaştırmaktadır. Bu tablodan da anlaşılacağı gibi, ŞHA ile tasarlanan aktüatörler, yüksek gerilmeler altında (200 MPa) oldukça yüksek şekil değişimleri (%10) sağlayabilmektedirler. Ancak yine tablodan görüldüğü gibi, bu malzemelerin frekans değerleri ve verimi düşüktür. Hareket hızının ve verimin kritik olmadığı uygulamalarda ŞHA ile tasarlanmış aktüatörler, elektrik motorlu, hidrolik ya da pinömatik aktüatörlere tercih edilebilir.

Tablo 3. Aktüatör performanslarının tiplerine göre karşılaştırılması [15]

Aktüatör Tipi	Gerilme (MPa)	Birim şekil Değişimi (%)	Verim (%)	Frekans (Hz)	Özgül İş (J/cm ³)	Özgül Güç (W/cm ³)
NiTi ŞHA	200	10	3	3	10	30
Piezoelektrik	35	0,2	50	5000	0,035	175
Tek kristalli piezoelektrik	300	1,7	90	5800	2,55	15000
İnsan kası	0,007-0,8	1-100	35	2-173	0,035	0,35
Hidrolik	20	50	80	4	5	20
Pinomatik	0,7	50	90	20	0,175	3,5

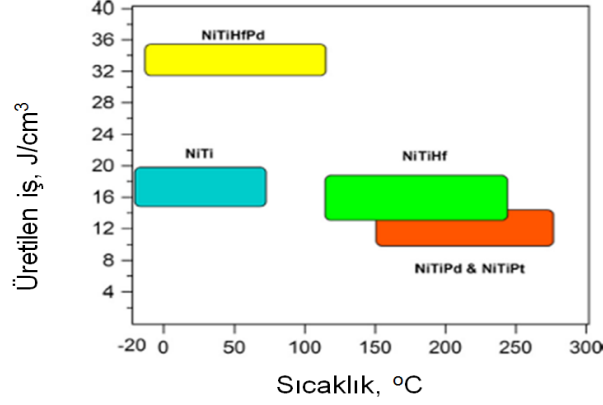
Şekil hafıza etkisi, aktüatör uygulamaları için kritik özelliktir ve bu deneylerden elde edilen gerilme-sıcaklık eğrilerinden, malzemenin iş üretme kabiliyeti (work output) hesaplanır. İş üretme kabiliyeti ise aktüatörün yapabileceği iş kapasitesini göstermesi açısından önemlidir. Yukarıdaki tabloda NiTi şekil hafızalı alaşımı ile tasarlanmış aktüatör özellikleri verilmiştir. Bu akıllı alaşımlar üzerindeki araştırmalar arttıkça, daha yüksek iş üretebilen ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışma potansiyeli olan alaşımlarda geliştirilmektedir. Şekil 13'te, NiTi bazlı bazı alaşım sistemlerinin şekil hafıza özelliği ile iş üretme kapasiteleri gösterilmiştir.

NiTiHf alaşımları, NiTi alaşımlarına benzer büyüklükte iş üretebilmekte ve dahası bu alaşımlar yüksek sıcaklıktada kullanılabilir. Bu üçlü alaşım sistemine Pd ilavesi ile geliştirilen NiTiHfPd alaşımları ise iki alaşımın (NiTi ve NiTiHf) çalışma sıcaklıkları arasında ancak iki katı kadar fazla iş üretebilmektedirler. Bu yetenek, NiTiHfPd alaşımlarının sahip olduğu yüksek mukavemet den kaynaklanmaktadır. Bu alaşım sistemleri 1000 MPa altında, plastik deformasyonsuz %3-4 birim şekil değişimi sağlayabilmektedir [10, 30]. Bu özgün özellik sayesinde, gelecekte daha portatif ve daha küçük mekanizmaların tasarlanması mümkün olabilecektir.

Şekil hafızalı alaşımların kullanımını avantajlı hale getiren bir diğer özgün özellik ise süperelastik davranıştır. Bu özellik sayesinde, ŞHA'lar enerji sönümleme (titreşim sönümleme, ses sönümleme, sismik şok dalgalarını sönümleme vb.) ile ilgili birçok uygulama da, hafiflik ve yararlılıklarından dolayı tercih edilmektedir [2]. Enerji sönümleme de önemli olan parametre süperelastik testler sırasında gözlemlenen mekanik histerezis değeridir. Şekil hafızalı alaşımların pratik uygulamalar için önem arz eden bazı özellikleri ve ilgili özelliklerin pratik uygulama alanları Tablo 4'te gösterilmiştir. Aşağıdaki şekillerde enerji sönümleme kapasitesinin nasıl

E. ACAR, T. OKTAY

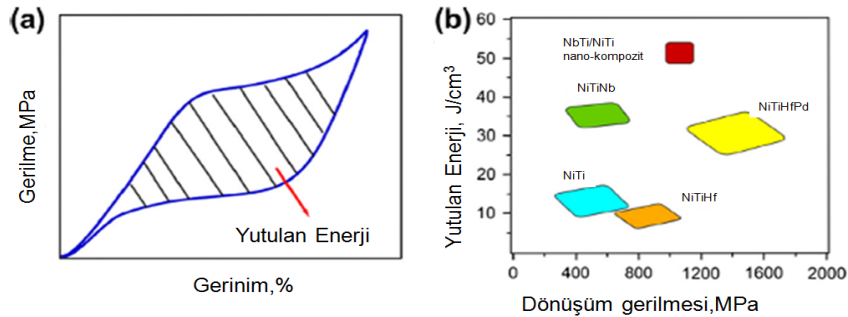
hesaplandığı ve bazı NiTi-bazlı alaşımlar için mekanik histerezis ve enerji sönümleme kapasiteleri verilmiştir. Şekil 14a’da tipik bir süperelastik eğri verilmiş ve bu eğride taralı alan malzemenin sönümleyebileceği enerji miktarını göstermektedir.



Şekil 13. NiTi-bazlı şekil hafızalı alaşımların iş üretim miktarlarının karşılaştırılması [30]

Tablo 4. Şekil hafızalı alaşımların özellikleri ve ilgili açıklamalar [18]

Şekil Hafızalı Alaşım Özelliği	Açıklama
Şekil hafıza etkisi	Malzeme aktüatör uygulamalarında kullanılabilir, gerilme üretebilir
Süperelastisite	Malzeme yüksek miktarda deformasyonu toparlayabilir
Histerezis	Faz dönüşümü sırasında enerji sönümleme
Yüksek aktüasyon gerilmesi (400-700 MPa)	Aynı iş daha küçük mekanizmalar yardımı ile yapılabilir
Yüksek aktüasyon şekil değişimi (yaklaşık %8)	Küçük mekanizmalar yüksek şekil değişimi sağlayabilir
Yüksek enerji yoğunluğu (yaklaşık 1200J/K)	Daha küçük mekanizmalar iş sağlayabilir
Üç boyutlu aktüasyon	Farklı şekillerde üretilen çok kristalli malzemeler tasarımlarda kullanılabilir
Aktüasyon frekans	Düşük frekans kullanımı kısıtlar
Enerji verimi (% 10-15)	Aktüasyon için gereken ısı enerjisi, üretilen işten daha fazla
Dönüşüm kaynaklı plastisite	Dönüşüm çevrimi arttıkça malzeme içinde kalıcı deformasyon birikir ve hasara neden olabilir

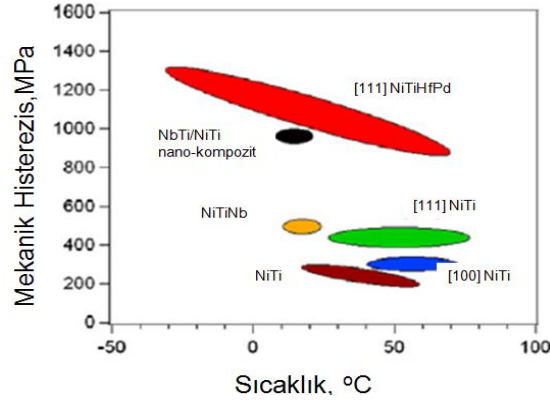


Şekil 14. NiTi bazlı şekil hafızalı alaşımların süperelastisite ile sönümleyebildiği enerji (absorbed energy) miktarlarının karşılaştırılması [30]

Şekil 14b’de ise bazı NiTi-bazlı şekil hafızalı alaşımların sönümleme kapasiteleri ve faz dönüşümü yapabileceği gerilme değerleri verilmiştir. Bu grafiğe göre en yüksek sönümleme kapasitesine sahip malzeme

HAVACILIK VE UZAY UYGULAMALARINDA ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

NbTi/NiTi nanokompozit malzemesidir. Diğer taraftan, NiTiHfPd alaşımı ise daha düşük sönümlene kapasitesine sahip olmakla beraber, faz dönüşümü gerçekleştirebileceği gerilme değerleri diğer alaşımlardan yüksektir. Şekil 15'te ise NiTi-bazlı malzemelerin süperelastik eğrilerden hesaplanmış mekanik histerezis değerleri görülmektedir. Bildiğimiz kadarıyla, bu alanda şimdiye kadar rapor edilmiş en yüksek mekanik histerezis değerine [111] doğrultulu NiTiHfPd tek kristal şekil hafızalı alaşımı sahiptir [37].



Şekil 15. NiTi bazlı şekil hafızalı alaşımların sıcaklığa göre mekanik histerezis değerlerinin karşılaştırılması [37]

Şekil hafızalı alaşımların genel olarak dayanımlarının diğer akıllı malzemelere göre daha iyi olduğu bilinmektedir. Bu özellik ŞHA'ların mukavemet gerektiren birçok alanda kullanımını kolaylaştırmaktadır. Diğer taraftan, NiTi alaşımlarının biyoyumlu ve korozyon dayanımlarının yüksek olduğu bilinmektedir. Bu özellik sayesinde sağlık alanında kullanımı oldukça yaygındır.

Avantajlarının yanında, şekil hafızalı alaşımların yaygın kullanımını engelleyen bazı zorlukların olduğu da bilinmektedir. Bunların başlıcaları, üretiminin diğer yapısal metallere (çelik, alüminyum vb.) göre daha maliyetli olmasıdır. Yine diğer yapısal malzemelere göre yorulma davranışları düşüktür ve geliştirilmesi gerekmektedir.

Frekansının ve veriminin düşük olması da özellikle aktüatör uygulamalarında bir dezavantaj oluşturmaktadır. Tablo 5'te NiTi ŞHA'ların farklı yükleme tiplerine göre verimlerini ve enerji yoğunluklarını göstermektedir. Görüldüğü gibi şekil hafızalı alaşımların verimleri (malzemeye verilen enerji/alınan enerji) oldukça düşüktür. Dolayısıyla, ŞHA ile tasarlanan aktüatörlerin, enerji verimliliğinin önemli olmadığı yerlerde kullanılması gerekir.

Tablo 5. NiTi alaşımları kullanılarak üretilmiş aktüatörlerin farklı yükleme tiplerine göre verim ve enerji yoğunluğu [43]

Yükleme Biçimi	Verim (%)	Enerji Yoğunluğu (J/kg)
Çekme	1,3	446
Burma	0,23	82
Eğme	0,013	4,6

Not: Karşılaştırma için sadece elastik deformasyon miktarları kullanılarak hesaplanmıştır.

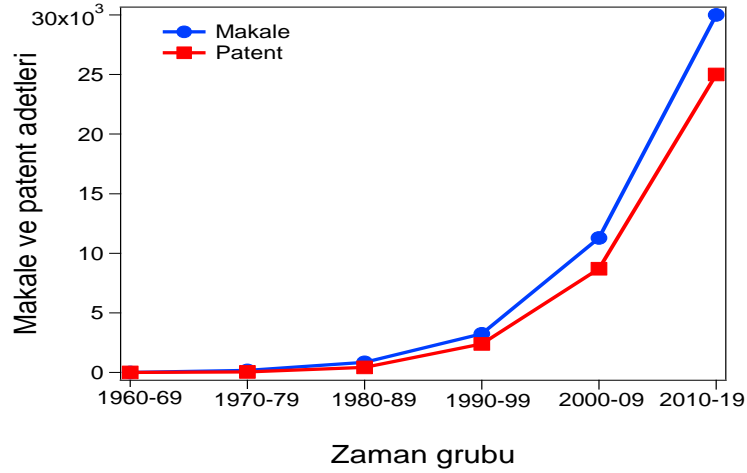
Buna rağmen, akıllı malzeme pazarının yaklaşık %15-20 sini oluşturan şekil hafızalı alaşımların kullanımı birçok alanda gün geçtikçe artmaktadır [15]. Çünkü, akıllı malzemelerin avantajları, dezavantajlarından fazla ve giderek aradaki fark artmaktadır. Gün geçtikçe şekil hafızalı alaşım endüstrisi büyümekte ve dolayısı ile malzeme üretim maliyetleri düşmektedir. Şekil hafızalı alaşım endüstrisinin gelişimi, malzeme kalitesinde beraberinde getirmektedir.

4. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR İLE İLGİLİ ALINMIŞ PATENT ÖRNEKLERİ

Günümüze kadar şekil hafızalı alaşımlar ve bu alaşımlar kullanılarak tasarlanan mekanizmalar üzerine alınan patent sayısı, 10.000'i Amerika Birleşik Devletleri'nde olmak üzere tüm dünyada 20.000'in üzerindedir [15].

E. ACAR, T. OKTAY

Bununla beraber, günlük teknolojiye kazandırılmış patent sayısı kısıtlıdır. Aynı şekilde bilimsel yayın sayısı da gün geçtikçe artmakta ve şekil hafızalı alaşımların daha iyi anlaşılmasına yardım etmektedir. Şekil 16'daki grafikte ise yıllara göre şekil hafızalı alaşımlar ile ilgili yayın ve patent sayıları görülmektedir. Tablo 6 ise havacılık ve uzay alanlarında kullanılabilir şekil hafızalı alaşım ve bu malzemeler kullanılarak tasarlanan bazı mekanizma patentlerini göstermektedir.



Şekil 16. Şekil hafızalı alaşımlar ile ilgili makale ve patent sayılarının yıllara göre dağılımı [15]

Tablo 6. Havacılık ve uzay alanlarında kullanılabilir şekil hafızalı alaşım ve bu malzemeler kullanılarak tasarlanan bazı mekanizma patentleri

Patent Başlığı	Patent Yılı	Patent Sahibi	Referans
Strain-Detecting Composite Materials	2016	Wallace, Terryl A.ve ark.	[44]
Autonomous Slat-Cove-Filler Device for Reduction of Aeroacoustic Noise Associated with Aircraft Systems	2016	Turner, Travis L. ve ark.	[45]
Thermomechanical Methodology for Stabilizing Shape Memory Alloy (SMA) Response	2016	Padula, Santo	[46]
Mechanical Components from Highly Recoverable, Low Apparent Modulus Materials	2015	Padula, Santo ve ark.	[47]
Fast Response, Open-Celled Porous, Shape Memory Effect Actuators with Integrated Attachments	2015	Jardine ve Andrew Peter	[48]
Jet Engine Exhaust Nozzle Flow Effector	2014	Turner, Travis L. ve ark.	[49]
Payload Launch Lock Mechanism	2014	Young, Ken ve Hindle,Timothy	[50]
TROX TJN jet nozzles – acoustically and technically optimised	2013	TROX	[51]
Shape memory alloy linear actuator	2008	Yson AP ve Messinger RH.	[52]
Aircraft with shape memory alloys for retractable landing gear	2005	Kutlucinar,I	[26]
Variable area nozzle for gas turbine engines driven by shape memory alloy actuators	2006	Rey NM ve ark.	[53]
Stress induced interposed connector	2001	White PM	[54]
Extended life SMA actuator	1995	Thoma PE ve ark.	[55]
Shape memory bi-directional rotary actuator	1992	Swenson SR	[56]
Self-regulated actuator	1985	Morgan ve Yeager	[57]

HAVACILIK VE UZAY UYGULAMALARINDA ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR**5. SONUÇLAR**

Sonuç olarak, şekil hafızalı alaşımlar, havacılık ve uzay alanları için önemli olan akıllı malzemelerdir. Aktüatör uygulamaları için, mukavemet ve şekil değişim değerlerinin yüksek olması nedeni ile diğer akıllı malzemelere kıyasla avantajlı durumdadırlar. Ancak, frekans ve verimleri düşük olduğundan kullanım yerleri kısıtlı olmaktadır. Gelecekte endüstride daha yaygın kullanılması için malzeme üretim maliyetlerinin, son ürün kalitelerinin ve yorulma davranışlarının iyileştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] FUNAKUBO, H., Shape Memory Alloys, Taylor & Francis, New York, ABD, 1987.
- [2] WAYMAN, C.M., OTSUKA, K., Shape Memory Materials, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1998.
- [3] KARACA, H.E., SAGHAIAN, S.M., TOBE, H., ACAR, E., BASARAN, B., NAGASAKO, M., KAINUMA, R., NOEBE, R.D. “Diffusionless Phase Transformation Characteristics of Mn_{75.7}Pt_{24.3}”, J. Alloys Compd, 589; 412–415, 2014.
- [4] WOLLANTS, P., ROOS, J.R., DELAEY, L., “On the Stress-Dependence of the Latent Heat of Transformation as related to the Efficiency of a Work Performing Cycle of a Memory Engine”, Scr. Metall, 14;1217–1223, 1980.
- [5] WOLLANTS, P., ROOS, J.R., DELAEY, L., “Thermally- and Stress-Induced Thermoelastic Martensitic Transformations in the Reference Frame of Equilibrium Thermodynamics”, Prog. Mater. Sci, 37; 227-288, 1993.
- [6] SALZBRENNER, R.J., COHEN, M., “On the Thermodynamics of Thermoelastic Martensitic Transformations”, Acta Metall, 27; 739–748, 1979.
- [7] TONG, H., WAYMAN, C.M., “Thermodynamics of Thermoelastic Martensitic Transformations”, Acta Metall, 23;209–215, 1975.
- [8] ACAR, E., Precipitation, Orientation and Composition Effects on the Shape Memory Properties of High Strength NiTiHfPd Alloys, PhD Dissertation, University of Kentucky, 2014.
- [9] KAYA, I., TOBE, H., KARACA, H.E., ACAR, E., CHUMLYAKOV, Y., “Shape Memory Behavior of [111]-Oriented NiTi Single Crystals after Stress-Assisted Aging” Acta Metall. Sin. (English Lett), 29; 282–286, 2016.
- [10] KARACA, H.E., ACAR, E., BASARAN, B., NOEBE, R.D., BIGELOW, G., GARG, A., YANG, F., MILLS, M.J., CHUMLYAKOV, Y., “Effects of Aging on [111]-Oriented NiTiHfPd Single Crystals under Compression”, Scr. Mater, 67;728–731, 2012.
- [11] ACAR, E., KARACA, H.E., BASARAN, B., YANG, F., MILLS, M.J., NOEBE, R.D., CHUMLYAKOV, Y., “Role of Aging Time on the Microstructure and Shape Memory Properties of NiTiHfPd Single Crystals”, Mater. Sci. Eng. A, 573;161–165, 2013.
- [12] ACAR, E., “Dynamic Mechanical Response of a Ni_{45.7}Ti_{29.3}Hf₂₀Pd₅ Alloy”, Mater. Sci. Eng. A., 633;169-175, 2015.
- [13] ACAR, E., TOBE, H., KAYA, I., KARACA, H.E., CHUMLYAKOV, Y., “Compressive Response of Ni_{45.3}Ti_{34.7}Hf₁₅Pd₅ and Ni_{45.3}Ti_{29.7}Hf₂₀Pd₅ Shape-Memory Alloys”, J. Mater. Sci., 50;1924-1934, 2015.
- [14] KARACA, H.E., ACAR, E., TOBE, H., SAGHAIAN, S.M., “NiTiHf-Based Shape Memory Alloys”, Mater. Sci. Technol., 30;1530–1544, 2014.
- [15] MOHD JANI, J., LEARY, M., SUBIC, A., GIBSON, M.A., “A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities”, Mater. Des., 56; 1078–1113, 2014.
- [16] [http:// www.materialstoday.com/composite-applications/news/aiaa-names-top-ten-emerging-aerospace/](http://www.materialstoday.com/composite-applications/news/aiaa-names-top-ten-emerging-aerospace/)” (erişim tarihi 25.01.2017).
- [17] BIL, C., MASSEY, K., ABDULLAH, E.J., “Wing Morphing Control with Shape Memory Alloy Actuators”, J. Intell. Mater. Syst. Struct., 24;879–898, 2013.
- [18] HARTL, D.J., LAGOUDAS, D.C., “Aerospace Applications of Shape Memory Alloys”, Proc. Inst. Mech. Eng. Part G, J. Aerosp. Eng., 221;535–552, 2007.
- [19] GHEORGHITA, V., GUMPEL, P., STRITTMATTER, J., ANGHEL, C., HEITZ, T., SENN, M., “Using Shape Memory Alloys in Automotive Safety Systems”, Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress: Volume 7: Vehicle Design and Testing (I), Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 909-917, 2013.

E. ACAR, T. OKTAY

- [20] DUNNE, J.P., HOPKINS, M.A., BAUMANN, E.W., PITT, D.M., EDWARD, V.W., "Overview of the SAMPSON Smart Inlet", 6th Annual International symposium on smart structures and materials conference, 1-5, 1999.
- [21] MANI, R., LAGOUDAS, D.C., REDINIOTIS, O.K., "MEMS-Based Active Skin for Turbulent Drag Reduction", Proceedings of the SPIE, 5056; 9–20, 2003.
- [22] HARTL, D.C., LAGOUDAS, D.C., CALKINS, F.T., MABE, J.H., "Use of a Ni60Ti Shape Memory Alloy for Active Jet Engine Chevron Application: I. Thermomechanical Characterization", Smart Mater. Struct., 19;15020, 2010.
- [23] KUDVA, J.N., "Overview of the DARPA Smart Wing Project. J. Intell. Mater. Syst. Struct". 15; 261-267, 2004.
- [24] SINGH, K., SIROHI, J., CHOPRA, I., "An Improved Shape Memory Alloy Actuator for Rotor Blade Tracking", J. Intell. Mater. Syst. Struct., 14;767–786, 2003.
- [25] STACHOWIAK, G.B., MCCORMICK, P.G., "Shape Memory Behaviour Associated with the R and Martensitic Transformations in a NiTi Alloy", Acta Metall., 36; 291–297, 1988.
- [26] KUTLUCINAR, I., Aircraft with Shape Memory Alloys for Retractable Landing Gear. US Patent 6938416B1, 2005.
- [27] GERACI, F., COOPER, J.E., AMPRIKIDIS, M., "Development of Smart Vortex Generators", Proc. SPIE 5056, Smart Structures and Materials, 5056;1–8, 2003.
- [28] BALTA, J.A., SIMPSON, J., MICHAUD, V., MANSON, J.A.E., SCHROOTEN, J., "Embedded Shape Memory Alloys Confer Aerodynamic Profile Adaptivity", Smart Mater. Bull., 12; 8–12, 2001.
- [29] HUANG, W., Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures. PhD Dissertation, University of Cambridge, 1998.
- [30] KARACA, H.E., ACAR, E., DED, G.S., BASARAN, B., TOBE, H., NOEBE, R.D., BİGELOW, G., CHUMLYAKOV, Y., "Shape Memory Behavior of High Strength NiTiHfPd Polycrystalline Alloys", Acta Mater., 61;5036–5049, 2013.
- [31] ELZEY, D.M., SOFLA, A.Y.N., WADLEY, H.N.G., "A Bio-Inspired High-Authority Actuator for Shape Morphing Structures", Proc. SPIE 5053, Smart Structures and Materials., 5053;92–100, 2003.
- [32] NGUYEN, N.T., PRECUP, N., LIVNE, E., URNES, J., DICKEY, E., NELSON, C., CHIEW, J., RODRIGUEZ, D., TING, E., LEBOPFSKY, S., "Wind Tunnel Investigation of a Flexible Wing High-Lift Configuration with a Variable Camber Continuous Trailing Edge Flap Design", 33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2015.
- [33] <http://flexsys.com>. (erişim tarihi 25.01.2017).
- [34] KARACA, H.E., ACAR, E., DED, G.S., SAGHAIAN, S.M., BASARAN, B., TOBE, H., KOK, M., MAIER, H.J., NOEBE, R.D., CHUMLYAKOV, Y., "Microstructure and Transformation related Behaviors of a Ni45.3Ti29.7Hf20Cu5 High Temperature Shape Memory Alloy", Mater. Sci. Eng. A., 627; 82–94, 2015.
- [35] ACAR, E., KARACA, H.E., TOBE, H., NOEBE, R.D., CHUMLYAKOV, Y., "Orientation Dependence of the Shape Memory Properties in Aged Ni45.3Ti29.7Hf20Pd5 Single Crystals", Intermetallics, 54;60–68, 2014.
- [36] ACAR, E., KARACA, H.E., TOBE, H., NOEBE, R.D., CHUMLYAKOV, Y., "Characterization of the Shape Memory Properties of a Ni45.3Ti39.7Hf10Pd5 Alloy", J. Alloys Compd., 578;297–302, 2013.
- [37] KARACA, H.E., ACAR, E., BASARAN, B., NOEBE, R.D., CHUMLYAKOV, Y., "Superelastic Response and Damping Capacity of Ultrahigh-strength [111]-Oriented NiTiHfPd Single Crystals", Scr. Mater., 67; 447–450, 2012.
- [38] ACAR, E., OZBULUT, O.E., KARACA, H.E., "Experimental Investigation and Modeling of the Loading Rate and Temperature Dependent Superelastic Response of a High Performance Shape-Memory Alloy", Smart Mater. Struct., 24; 75020, 2015.
- [39] BARBARINO, S., BILGEN, O., AJAJ, R.M., FRISWELL, M.I., INMAN, D. J., "A Review of Morphing Aircraft", J. Intell. Mater. Syst. Struct., 22;823–877, 2011.
- [40] RAZOV, A.I., CHERNIAVSKY, A.G., "Applications of Shape Memory Alloys in Space Engineering: Past and Future", Space Mechanisms and Tribology, Proceedings of the 8th European Symposium. 141, 1999.
- [41] WILLEY, C.E., HUETTL, B., HILL, S.W., "Design and Development of a Miniature Mechanisms Tool-kit for Micro Spacecraft", In Proceedings of the 35th Aerospace Mechanisms Symposium, 2001.
- [42] CARPENTER B., LYONS, J., "EO-1 Technology Validation Report: Lightweight Flexible Solar Array Experiment", NASA Technical report, 2001.
- [43] REYNAERTS, D., VAN BRUSSEL, H., "Design Aspects of Shape Memory Actuators. Mechatronics" 8;635–656, 1998.
- [44] WALLACE, T.A., SMITH, S.W., PIASCIK, R.S., HORNE, M.R., MESSICK, P.L., ALEXA, J.A.,

HAVACILIK VE UZAY UYGULAMALARINDA ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

- GLAESSGEN, E.H., HAILER, B.T., Strain-detecting Composite Materials. US-Patent-9,499,882, 2016.
- [45] TURNER, T.L., KIDD, R.T., LOCKARD, D.P., KHORRAMI, M.R., STREETT, C.L., WEBER, D.L., Autonomous Slat-Cove-Filler Device for Reduction of Aeroacoustic Noise associated with Aircraft Systems. US-Patent-9,242,720, 2016.
- [46] PADULA, S., Thermomechanical Methodology for Stabilizing Shape Memory Alloy (SMA) Response. US-Patent-9,476,113, 2016.
- [47] PADULA, S., NOEBE, R.D., STANFORD, M.K., DELLACORTE, C., Mechanical Components from Highly Recoverable, Low Apparent Modulus Materials. US-Patent-9,169,545, 2015.
- [48] JARDINE, A.P., Fast Response, Open-Celled Porous, Shape Memory Effect Actuators with Integrated Attachments. US-Patent-9,010,106, 2015.
- [49] TURNER, G.C., TRAVIS L., CANO, C., ROBERTO J., SILOX, R.J., BUEHRLE, R.D., CAGLE, CHRISTOPHER M., CABELL, R.H., HILTON, I., Jet Engine Exhaust Nozzle Flow Effector. US-Patent-8,683,807, 2014.
- [50] YOUNG, T., HINDLE, K., Payload Launch Lock Mechanism. US-Patent-8,708,322, 2014.
- [51] GMBH, T., TROX T.J.N., Jet Nozzles – Acoustically and Technically Optimised, 2013.
- [52] YSON, A.P., MESSINGER, R.H., Shape Memory Alloy Linear Actuator. US Patent 7464548B2, 2008.
- [53] REY, N.M., MILLER, R.M., TILLMAN, T.G., RUKUS, R.M., KETTLE, J.M., Variable Area Nozzle for Gas Turbine Engines Driven by Shape Memory Alloy Actuators. US Patents 7004047, 2006.
- [54] SCHRON, J.H., SUMMERS, J.L., Clamping Device. EP Patent 834,380, 1998.
- [55] THOMA, P, KAO, M., SCHMITZ, D., Extended Life SMA Actuator. US Patents 5419788, 1995.
- [56] SWENSON, S.R., Shape Memory Bi-directional Rotary Actuator. US Patent 51272281992, 1992.
- [57] MORGAN, R.K., YAEGER, J.R., Self-regulated Actuator. US Patents 4524343, 1985.